

## Об учете вихревых токов в массивном магнитопроводе

*Калиниченко Ю.С., Харьковская национальная академия городского хозяйства*

*Одегов Н.Н., Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков*

Действие вихревых токов в машине постоянного тока связано с весьма важными для машины процессами, такими как ее коммутация, добавочные потери, перенапряжения. Вихревые токи возникают в электропроводящих массивных элементах и связаны с нестационарными процессами, протекающими в этих элементах. К этим процессам можно отнести следующие:

- возникновение вихревого тока в пазовой части проводников обмотки якоря в результате повышенной частоты перемагничивания якоря, как правило на повышенных оборотах машины. Как известно, действие вихревого тока в этом случае приводит к выделению добавочных потерь в обмотке якоря, которое учитывают коэффициентом Фильда ;
- вихревые токи в коммутирующих секциях якорной обмотки. Их действие способно оказывать существенное влияние на процесс коммутации посредством изменения параметров коммутирующей секции – снижения ее индуктивности и увеличения активного сопротивления;
- вихревые токи в станине при кратковременном прерывании и последующем восстановлении напряжения тягового двигателя, приводящие к перенапряжениям машины при восстановлении напряжения;
- вихревые токи в массивных элементах магнитопровода (станина, сердечники дополнительных полюсов, пакет стальных прокладок между дополнительным полюсом и станиной), приводящие к расстройствам коммутации при толчкообразных нагрузках или просто при пульсирующем питании двигателя со значительной частотой пульсаций.

Это неполный перечень задач, обладающих общностью постановки, актуальность которых не вызывает сомнений.

*О постановке задачи.* Действие вихревого тока в участках электрической машины связано с неравномерностью распределения на рассматриваемом участке силовых линий магнитного поля. Решение задачи распределения линий напряженности магнитного поля  $H_n$  по сечению участка с вихревым током является дуальным решением задачи о распределении плотности вихревого тока  $j$  по рассматриваемому се-

чению. Для анализа особенностей действия вихревого поля проделана работа по аналитическому решению обозначенных задач.

Уравнение для вихревого поля (тока) удобно представлять в виде функции безразмерной относительной координаты  $\xi = \frac{x}{a}$ , которая изменяется в пределах  $0 \leq \xi \leq 1; 0 \leq x \leq a$ . Здесь  $a$  – ширина участка по координате  $x$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1(\xi, t)}{\partial \xi^2} &= T \times \frac{\partial H_1(\xi, t)}{\partial t} \quad \text{или} \\ \frac{\partial^2 B_1(\xi, t)}{\partial \xi^2} &= T \times \frac{\partial B_1(\xi, t)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь постоянная  $T$  представляет постоянную времени вихревых токов и определяется:

$$T = \frac{\mu_2}{\rho_1} \times a^2. \quad (2)$$

Здесь  $\rho_1$  – удельное электрическое сопротивление среды с вихревым током (полем), а  $\mu_2$  – магнитная проницаемость «эквивалентной среды», в которой действует вихревой ток в массивном участке, входящем в схему замещения. Соотношения магнитной проницаемости этой эквивалентной среды  $\mu_2$  с реальной магнитной проницаемостью массивного участка  $\mu_1$  имеет вид:

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{Y_2}{Y_1}. \quad (3)$$

Здесь  $Y_2$  – эквивалентная магнитная проводимость всей магнитной цепи, а  $\mu_1, Y_1$  – удельная магнитная проницаемость и магнитная проводимость участка собственно с вихревым полем.

Из (1) получается и дуальное уравнение для плотности вихревого тока (4)  $j(\xi, t)$ :

$$\frac{\partial^2 j(\xi, t)}{\partial \xi^2} = T \times \frac{\partial j(\xi, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Задание начальных и граничных условий в (1) и (4) определяется конкретными условиями решаемых задач. Отметим, что формальное применение уравнений Максвелла в дифференциальной форме к уча-

стку с вихревым полем, дает погрешность в постоянной времени вихревого поля  $T$  в соотношении  $\mu_3/\mu_1$ .